

高频锰锌铁氧体材料最新进展与制作实例

茅柳强, 陆自强, 徐方, 刘九皋
耀润电子有限公司 浙江桐乡 314504

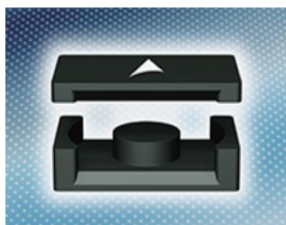
中图分类号: TM27 文献标识码: A 文章编号: 1606-7517(2016)04-12-146

软磁铁氧体的缺点是: 饱和磁通密度低, 磁导率低, 居里温度低; 优点是中高频损耗低, 成本低。前者限制了它的使用范围, 后者则有利于进入高频市场。近期国外一些公司推出了一些提高了性能的高频化锰锌铁氧体材料, 如最近报导的 TDK-EPCOS 推出的一款新型 N59 铁氧体磁材; 日立公司推出的 ML95S 和 ML90S 高频铁氧体磁心材料及川崎 (JFE) 公司 MC3 和改进的 MC2 高频材料等, 这些材料比原有品种大大降低了高频功耗。

TDK/EPCOS 公司新推的 N59 高频铁氧体材料, 具有

高频低损耗的特性。是专门为电源及变频器 (配备基于 GaN 的快速切换功率半导体) 应用而开发, 优化后的频率范围为 700kHz 至 2MHz。切换频率为 2MHz, 工作温度为 100℃时, 可达到最大传输功率。铁氧体磁材的最大居里温度为 280℃。

N59 铁氧体磁材尤其适用于磁环或平版变压器。其卓越的性能, 为今后设计电源小型化, 提供了非常好的解决方案。同时, 由于铁氧体磁材的低损耗特性, 其效率也大大提升, 这正是使用 N59 可显著节能的原因。详见以下报导:



铁氧体

高频低损耗

2015 四月

TDK集团最近推出了一款新型爱普科斯 (EPCOS) N59铁氧体磁材, 其具有高频低损耗的特性。该磁材专门为电源及变频器 (配备基于GaN的快速切换功率半导体) 应用而开发, 优化后的频率范围为700 kHz至2 MHz。

在切换频率为2 MHz, 工作温度为100 °C时, 可达到最大传输功率。铁氧体磁材的最大居里温度为280 °C。

N59铁氧体磁材尤其适用于磁环或平版变压器。其卓越的性能, 为今后设计电源小型化, 提供了非常好的解决方案。同时, 由于铁氧体磁材的低损耗特性, 其效率也大大提升, 这正是使用N59可显著节能的原因。

主要应用

- 电源变压器和转换器 (配备基于GaN的快速切换功率半导体)

主要特点和效益

- 频率为700 kHz至2 MHz时功耗低; 频率为2 MHz时, 传输功率达到最大

日立金属公司新推的 ML95S 和 ML90S 新材料在几 MHz 高频范围磁心损耗较小, 可使网络设备、汽车及智能手机配备的部件实现小型化和节能化。其关键在于使用粉末控制技术和热处理技术, 制作出了与镍锌铁氧体材料相比饱和磁通密度更高、高频损耗更低的锰锌铁氧体材料, 从而支持变压器和电感器高频化和大电流化, 实现网络设备的小型化和节能化, 今后日立金属公司还计划将该材料用于汽车电装部件和便携终端。详见以下报导:

【日經BP社報導】日立金屬公司開發出了高頻特性出色的錳鋅 (Mn-Zn) 類鐵氧體磁芯材料“ML95S”和“ML90S” (圖)。新材料在幾MHz高頻範圍內的磁芯損耗較小, 可使網路設備、汽車以及智慧手機配備的部件實現小型化和節能化。

此前也有過在0.5MHz~5MHz的高頻範圍採用鎳鋅 (Ni-Zn) 類鐵氧體材料的討論, 日立金屬此次通過組合使用粉末控制技術和熱處理技術, 實現了與Ni-Zn類鐵氧體材料相比飽和磁通密度更高、磁芯損耗更小的Mn-Zn類鐵氧體材料。這種材料在接近實際使用環境的高溫環境下 (80~100°C) 的磁芯損耗較小, 因此可以抑制功耗和發熱量。採用該材料後, 可使變壓器和電感器支援高頻化和大電流化, 實現網路設備的小型化和節能化。今後, 日立金屬還計劃把這款材料用於汽車電裝部件和便攜終端。

兩款產品的性能參數見右表。ML95S在500kHz~2MHz的頻率範圍內，尤其是在50mT以上的高磁通密度範圍內驅動時，損耗較小。比如，在頻率為1MHz、磁通密度為75mT（100°C）時，ML95S的磁芯損耗僅為原產品“MB28D”的1/3左右。ML90S在1MHz~5MHz的頻率範圍內，尤其在50mT以下的磁通密度範圍內驅動時，損耗較小。當頻率為2MHz、磁通密度為50mT（100°C）時，其磁芯損耗約為MB28D的1/5。

近幾年，伺服器等網路設備的容量和速度不斷提升，尤其是數據中心，為了降低空調電費、改善設施整體的能量效率，強烈要求網路設備實現小型化、降低排熱量。與此同時，伺服器電源中使用的半導體的高頻化和大電流化技術不斷發展，所採用的變壓器和電感器等無源元件也要求支援高頻化和大電流化。但是，在高頻範圍驅動原來的無源元件時，主要部材——磁芯材料的磁芯損耗非常高，因此電力轉換效率會出現下降。而且發熱量也較大，可能會給周邊部件帶來影響。這就需要在高頻範圍內磁芯損耗較低，而且不易發熱的磁芯材料。

另外，日立金屬將在日立Ferrite電子公司（總部：日本鳥取市）和日立金屬（香港）有限公司番禺工廠（廣東省廣州市）生產這種新材料。據介紹，量產體制已經建成。（本篇報導、照片與圖片，版權為日經BP社所有，僅供公司內部研究參考用，請勿隨意轉載）

		ML95S (此次开发产品)	ML90S (此次开发产品)	MB28D (该公司原产品)	NL80S (该公司原产品)
磁芯損耗	100°C	240kW/m ³	200kW/m ³	1,500kW/m ³	2,800kW/m ³
頻率1MHz 磁通密度50mT					
磁芯損耗	100°C	1,100kW/m ³	1,700kW/m ³	3,800kW/m ³	—
頻率1MHz 磁通密度75mT					
磁芯損耗	100°C	1,900kW/m ³	1,300kW/m ³	6,800kW/m ³	7,500kW/m ³
頻率2MHz 磁通密度50mT					
飽和磁通密度 ²	100°C	430mT	430mT	440mT	290mT
初磁導率		1,100	900	2,800	800
電阻率		5.0Ωm	4.5Ωm	8.0Ωm	10 ⁶ Ωm
居里溫度 ³		280°C	280°C	240°C	210°C

表：新開發的磁芯材料和原產品的性能參數比較

JFE 川崎公司高频锰锌铁氧体 MC2 材料的性能



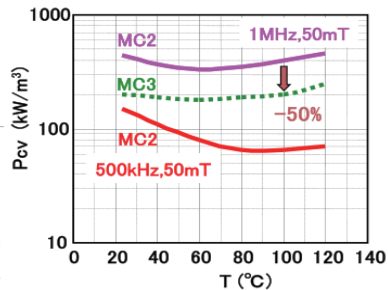
MnZn Ferrite for High Frequency Application : MC2

Low loss at from 500k to 1MHz

Application / SMPS driving at high frequencies

Material	MC2	
Core loss	P _{cv} (kW/m ³)	23°C 150
		60°C 80
		100°C 65
Effective saturation flux density (at 1200A/m)	B _{ms} (mT)	23°C 440
		60°C 330
		100°C 400
Effective saturation residual flux density	B _{rs} (mT)	23°C 180
		100°C 110
Initial permeability	μ _i / μ _o	1250
Curie point	T _c (°C)	≥260
Core density	d (kg/m ³)	4.8 × 10 ³
Resistivity	ρ (Ωm)	15

μ_o : vacuum permeability



MC3 (under development): 1~3MHz

不断地提高工作频率，多年来就是各公司的努力方向，早期日本TDK公司的PC50工作频率为500kHz至1MHz，日本FDK公司的7H20，日本TOKIN公司的B40也能在1MHz下工作。类似的材料还有日本JFE的MC2和德国SIEMENS的N49，荷兰PHILIPS公司的3F4，3F45，3F5工作频率都超过了1MHz。国内金宁公司（898）的JP5，天通的TP5A、TP5B工作频率都达到了500kHz至3MHz，早期东磁供普思的DMR1.2K甚至超越3MHz，达

到5.64MHz，东磁DMR24和新康达、精研、耀润电子等公司的类似高铁低锌高叠加材料居里点都已高于280°C。据称菲磁最近推出了改善的3C97+和居里点高达300°C的3C99，2015年川崎（JFE）公司更推出了居里点高达300°C、谷点140°C的高Bs低功耗材料MBT4等。

JFE（川崎公司）高居里点高Bs低功耗锰锌铁氧体材料性能



MnZn Ferrite Working at Higher Temperatures above 100°C: MBT4

Material		MB3	MB4	MB1H	MBT1	MBT4
Initial Permeability μ_i	23°C	2500	2500	1700	3400	1500
Saturation Flux Density B_{ms} [mT] @1200A/m	23°C	510	520	540	510	537
	60°C	450	470	505	460	503
	100°C	390	400	460	390	460
	130°C	325	350	410	340	405
	140°C	300	330	400	325	400
Core Loss @100kHz,200mT	Pcv [kW/m ³]					
	23°C	650	575	980	395	900
	60°C	440	375	600	365	605
	100°C	350	270	380	340	407
	120°C	390	350	550	390	332
	130°C	430	440	675	420	299
	140°C	485	525	775	465	286
Curie Point	Tc [°C]	215min	215min	300min	230min	300min
Resistivity	ρ [Ω m]	6.0	4.5	6.0	4.0	5.0
Density	d [kg/m ³]	4.9 × 10 ³		4.9 × 10 ³		4.9 × 10 ³

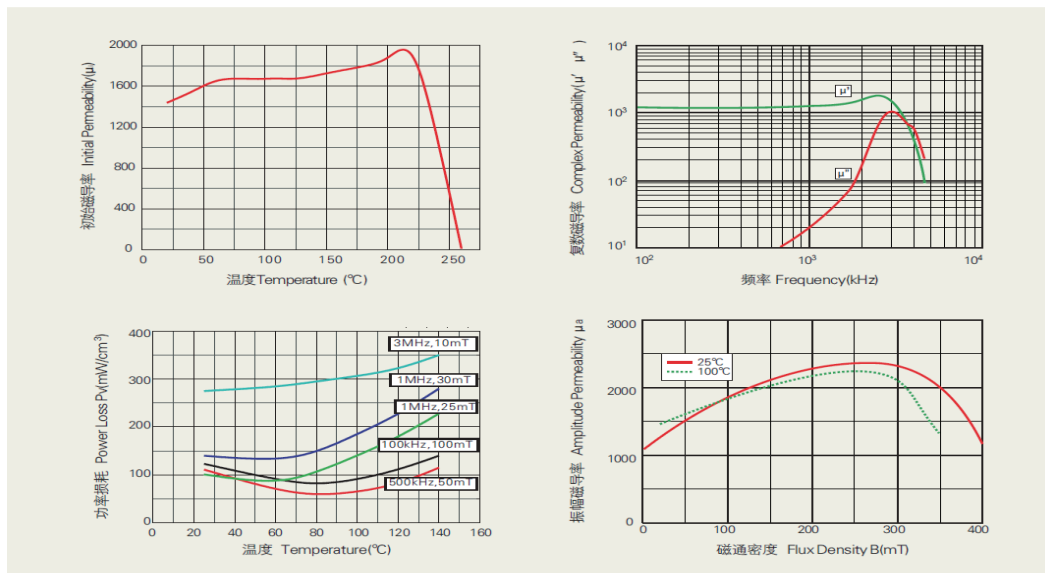
(provisional values of the lab. level)

下面列出十多年来各公司高频锰锌铁氧体材料的性能指标, 供客户参照对比选用。

东磁公司高频锰锌铁氧体材料的性能指标

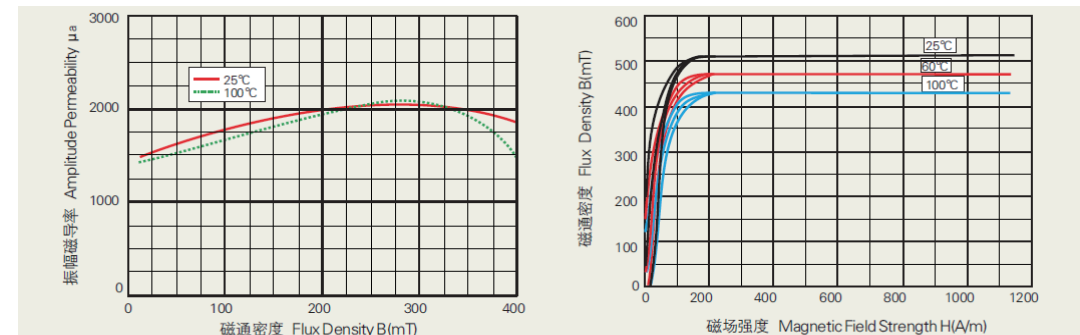
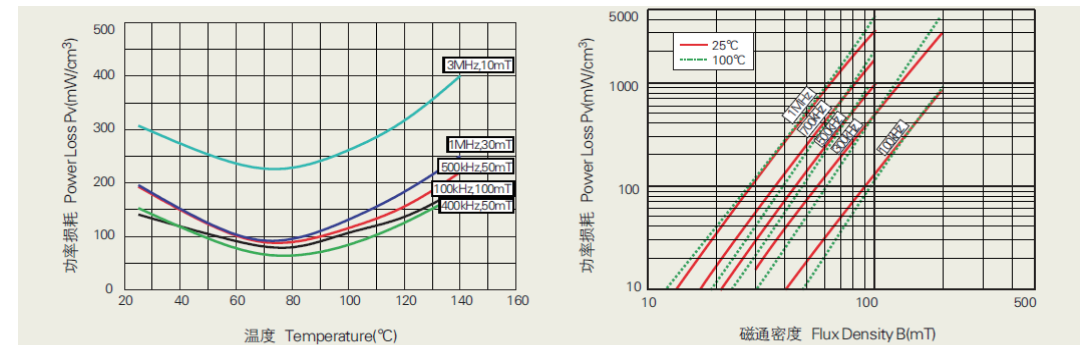
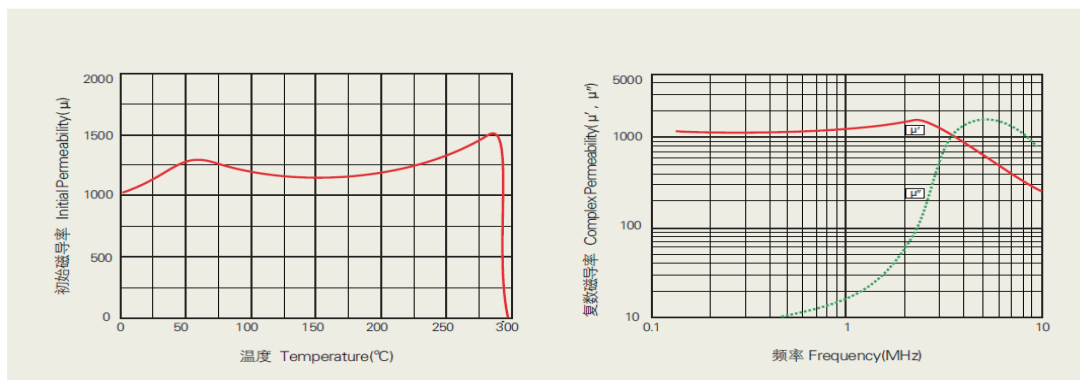
DMR50材料特性 · DMR50 Material characteristics

特性 SYMBOL	测试条件 CONDITIONS	典型值 VALUE
初始磁导率 μ_i Initial permeability	10kHz, B<0.25mT	25°C 1400 ± 20%
饱和磁通密度 B_s (mT) Saturation flux density	50Hz, 1194A/m	25°C 470
		100°C 380
剩磁 B_r (mT) Residual magnetic flux density		25°C 140
		100°C 98
矫顽力 H_c (A/m) Coercive force		25°C 37
		100°C 27
功耗 P_{cv} (mW/cm ³) Power loss	500kHz, 50mT	25°C 130
	500kHz, 50mT	100°C 80
居里温度 T_c (°C) Curie temperature	10kHz, B<0.25mT	>240
密度 d (g/cm ³) Density		25°C 4.8



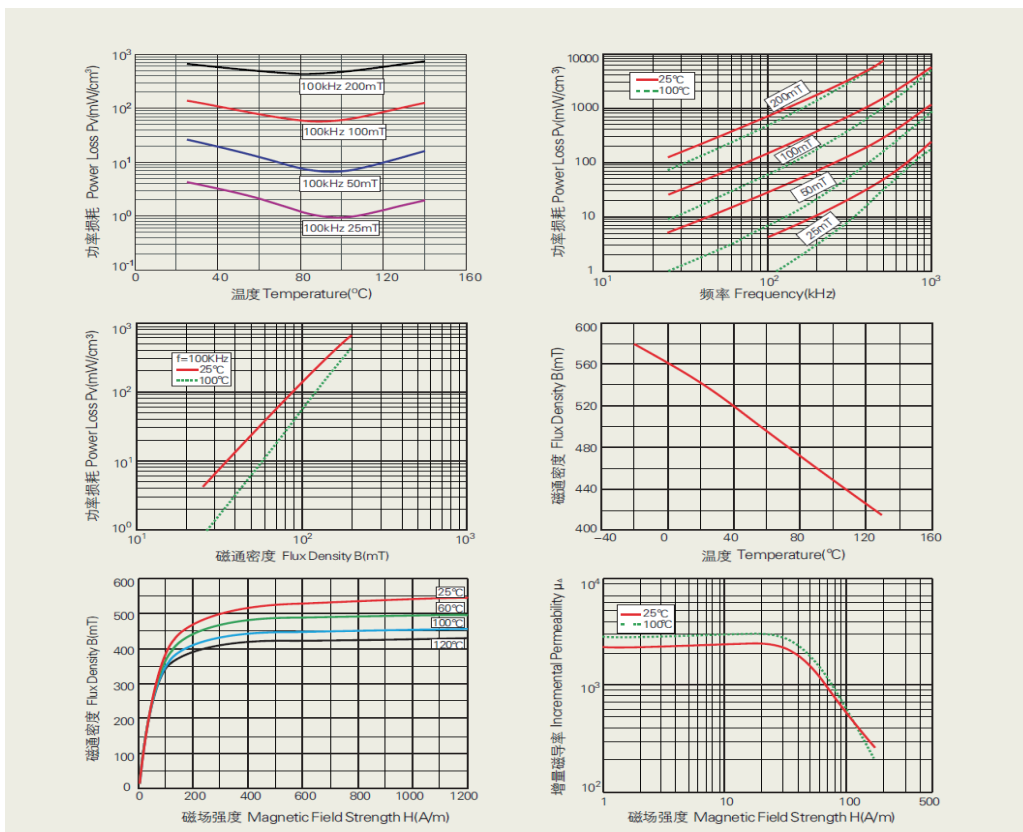
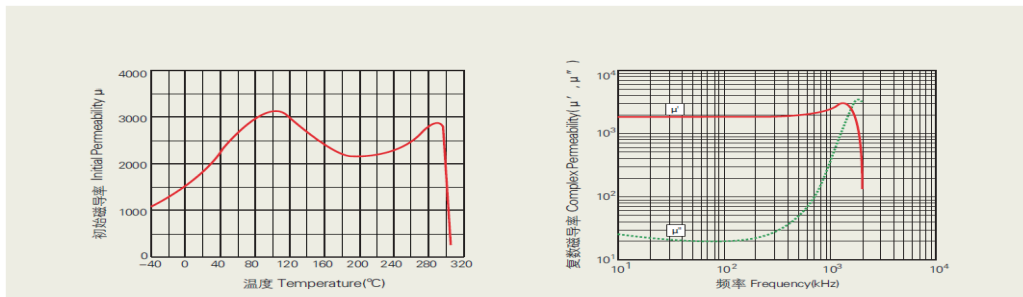
DMR50B材料特性 · DMR50B Material characteristics

特性 SYMBOL	测试条件 CONDITIONS		典型值 VALUE
初始磁导率 μ_i Initial permeability	10kHz, B<0.25mT	25°C	1500 ± 20%
饱和磁通密度 B_s (mT) Saturation flux density	50Hz, 1194A/m	25°C	510
		100°C	410
剩磁 B_r (mT) Residual Magnetic Flux Density		25°C	130
		100°C	90
矫顽力 H_c (A/m) Coercive force		25°C	30
		100°C	25
功耗 P_v (mW/cm ³) Power loss	100kHz, 100mT	100°C	150
	400kHz, 50mT	100°C	120
	500kHz, 50mT	100°C	150
	1MHz, 30mT	100°C	180
	3MHz, 10mT	100°C	260
居里温度 T_c (°C) Curie temperature	10kHz, B<0.25mT		> 240
密度 d (g/cm ³) Density		25°C	4.7



DMR24材料特性 · DMR24 Material Characteristics

特性 SYMBOL	测试条件 CONDITIONS		典型值 VALUE
初始磁导率 μ_i Initial permeability	10kHz, B<0.25mT	25°C	2000 ± 25%
饱和磁通密度 B_s (mT) Saturation Flux Density	50Hz, 1194A/m	25°C	540
		100°C	460
剩磁 B_r (mT) Residual Magnetic Flux Density	50Hz, 1194A/m	25°C	180
		100°C	65
矫顽力 H_c (A/m) Coercive Force	50Hz, 1194A/m	25°C	13
		100°C	11
功耗 P_v (mW/cm ³) Power loss	100kHz, 200mT	25°C	750
		100°C	445
	500kHz, 50mT	25°C	260
		100°C	140
居里温度 T_c (°C) Curie temperature	10kHz, B<0.25mT		>280
电阻率 ρ ($\Omega \cdot m$) Resistivity		25°C	8
密度 d (g/cm ³) Density		25°C	4.9

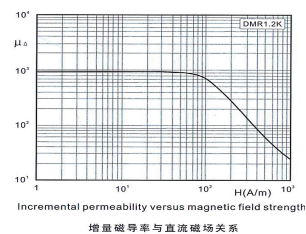
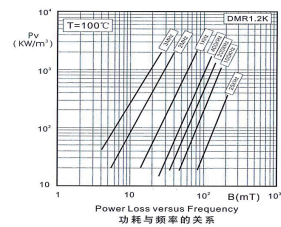
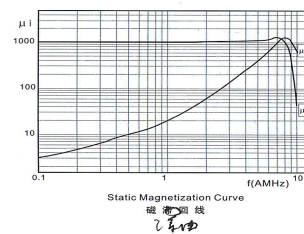
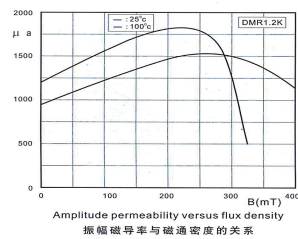
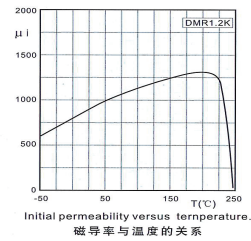
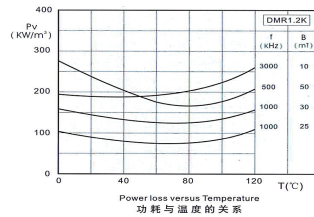


以上数据是根据标准样环 $\phi 25 \times \phi 15 \times 8$ 获得的典型数据, 有关产品的具体性能会在此基础上有所调整。
The above typical data are calculated from the standard toroid core. Specific performance of the product will be adjusted on this basis.

DMR1.2K 材料特性
DMR1.2K Material Characteristics

项目 Item	符号 Symbol	测试条件 Conditions	标称值 Value	单位 Unit
初始磁导率 Initial Permeability	μ_i	25°C; 10kHz; B<0.25mT	1200±25%	—
振幅磁导率 Amplitude Permeability	μ_a	100°C; 25kHz; 200mT	> 1700	—
饱和磁通密度 Saturation flux density	Bs	25°C; 50Hz; 1194A/m 100°C; 50Hz; 1194A/m 120°C; 50Hz; 1194A/m	500 420 400	mT
体积功耗 Power Loss	Pcv	100°C; 1MHz; 30mT 100°C; 3MHz; 10mT 100°C; 5.64MHz; 2.5mT	150 260 150	kW/m ³
矫顽力 Coercive Force	Hc	25°C	≤30	A/m
直流电阻率 Resistivity	ρ	25°C, DC	≈10	Ω·m
居里温度 Curie Temperature	Tc	f=10kHz B<0.25mT	>220	°C
密度 Density	d		≈4.7X10 ³	kg/m ³

DMR1.2K 材料特性曲线
DMR1.2K Material Characteristics Curve

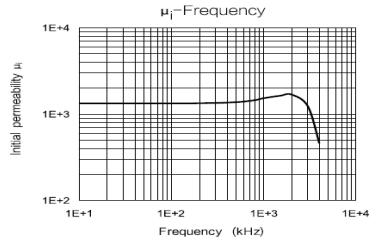
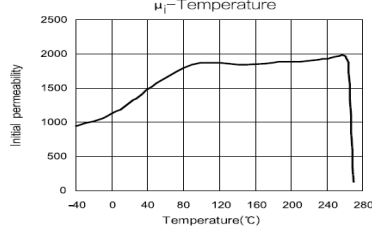
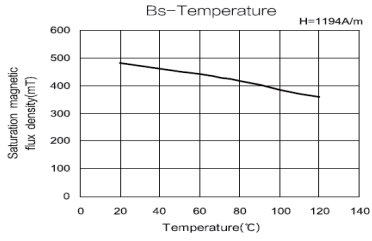


天通公司高频锰锌铁氧体材料的性能指标

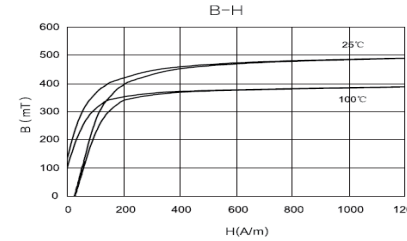
材料/Material:TP5

特点/Features:

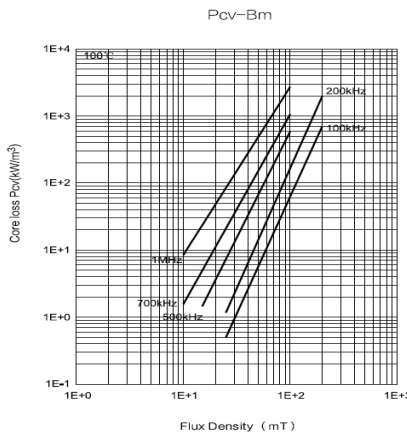
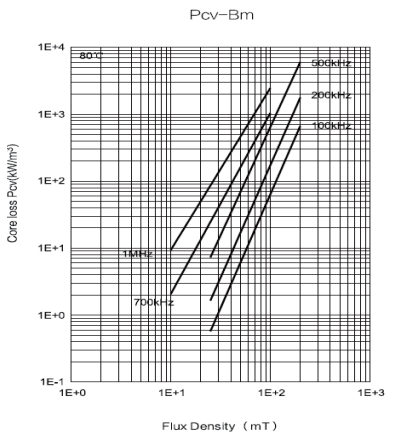
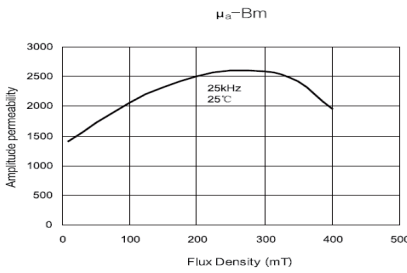
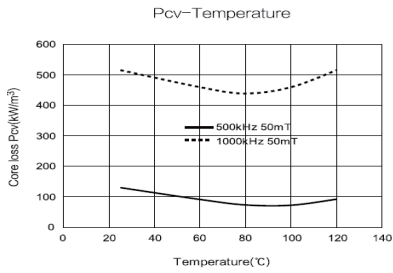
1. 主要应用于高频段 (300kHz到1MHz)/Mostly Used at High Frequency(From 300 kHz To 1 MHz)
2. 损耗最低的温度点在80°C/ The Temperature Point of The Lowest Core Loss is 80°C



Initial permeability	μ_i	25°C	1400±25%
Saturation magnetic flux density	Bs(mT)	25°C	470
		100°C	380
Remanence	Br(mT)	25°C	140
		100°C	98
Coercivity	Hc(A/m)	25°C	36.5
		100°C	27.2
Core loss Pcv(kW/m³)	500kHz 50mT	25°C	130
		100°C	80
	1MHz 50mT	60°C	600
		100°C	500
Curie temperature			≥240
Electrical resistivity	$\rho(\Omega\cdot m)$		8
Density	$d(kg/m^3)$		4.7×10^3
Test core: Toroid(mm)			
	OD:	25	
	ID:	15	
	H:	7.5	



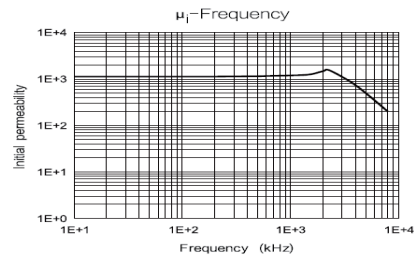
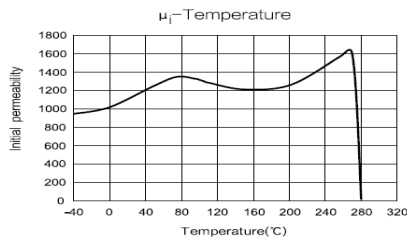
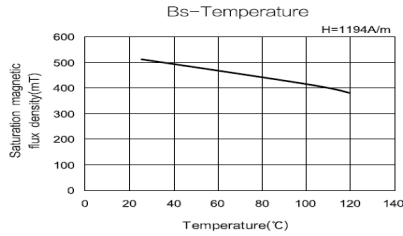
材料/Material:TP5



材料/Material:TP5B

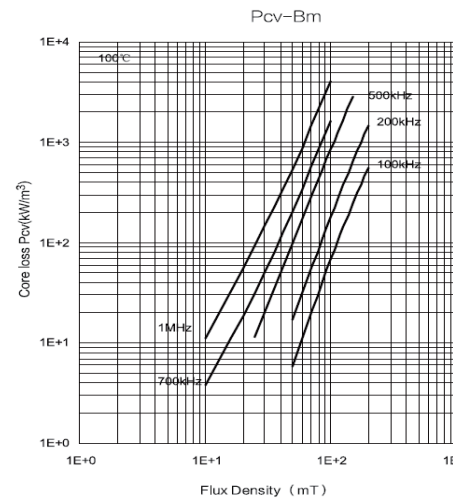
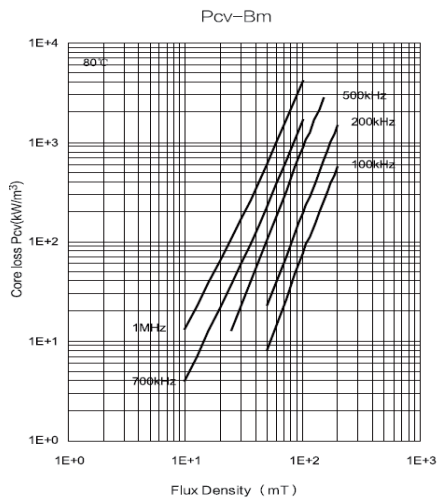
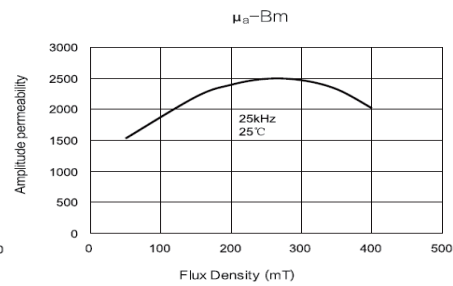
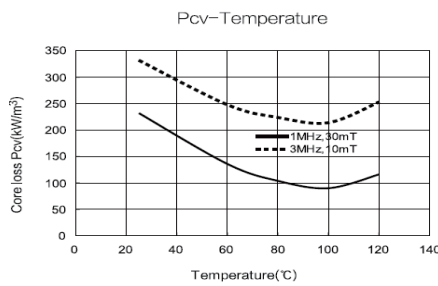
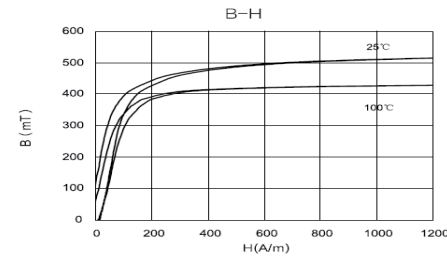
特点/Features:

1. 主要应用于超高频段 (1MHz ~ 3MHz)/ Mostly used at high Frequency(From 1MHz to 3MHz)
2. 低磁芯损耗, 较高的饱和磁感应强度/ Low Core Loss and High Bs
3. 功耗最低点在100°C左右/The minimum Core Loss is around 100°C



Initial permeability	μ_i	25°C	1200±25%
Saturation magnetic flux density	B_s (mT)	25°C	510
		100°C	410
Remanence	B_r (mT)	25°C	95
		100°C	45
Coercivity	H_c (A/m)	25°C	22
		100°C	16
Core loss P_{cv} (kW/m ³)	1MHz	25°C	250
	30mT	100°C	100
	3MHz	25°C	350
	10mT	100°C	230
Curie temperature	T_c (°C)	≥ 265	
Electrical resistivity	ρ (Ω·m)	9	
Density	d (kg/m ³)	4.7×10 ³	

Test core: Toroid(mm)
OD: 25
ID: 15
H: 7.5



越峰 (ACME) 公司高频锰锌铁氧体材料的性能指标



10 | Material Characteristics (Mn-Zn Ferrite)

Material Characteristics (4)

	Symbol	Unit	Measuring Conditions			High Frequency Low Loss Material
			Freq.	Flux den.	Temp.	P6 $\mu\text{W/m}^3$
Initial Permeability	μ_i		$\leq 10\text{kHz}$	0.25mT	25°C	900 \pm 25%
Amplitude Permeability	μ_a		25kHz	200mT	25°C	1800
					100°C	1500
Power Loss	Pv	KW/m ³	1MHz	50mT	25°C	300
					100°C	250
			3MHz	10mT	25°C	150
					100°C	150
Saturation Flux Density	Bms	mT	10kHz	H = 1200A/m	25°C	490
					100°C	400
Remanence	Brms	mT	10kHz	H = 1200A/m	25°C	200
					100°C	130
Coercivity	Hc	A/m	10kHz	H = 1200A/m	25°C	45
					100°C	35
Hysteresis Material Constant	η_B	10 ⁻⁶ /mT	10kHz	1.5-3.0mT	25°C	< 1
Disaccommodation Factor	D _f	10 ⁻⁶	10kHz	< 0.25 mT	25°C	< 2
Curie Temperature	T _c	°C				> 250
Resistivity	ρ	Ωm				10.00
Density	d	g/cm ³				4.80

Note: Material characteristics are typical for a toroid core.
Product specification will differ from these data due to the influence of geometry and size.

EPCOS 公司高频锰锌铁氧体材料的性能指标



SIFERRIT materials
N49

Material properties

Preferred application	Power transformers			
Material	N49			
Base material	MnZn			
	Symbol	Unit		
Initial permeability (T = 25 °C)	μ_i		1500 $\pm 25\%$	
Flux density (H = 1200 A/m, f = 10 kHz)	B _S (25 °C)	mT	490	
	B _S (100 °C)	mT	400	
Coercive field strength (f = 10 kHz)	H _c (25 °C)	A/m	38	
	H _c (100 °C)	A/m	33	
Optimum frequency range		kHz	300 ... 1000	
	Hysteresis material constant	η_B	10 ⁻⁶ /mT	<0.4
Curie temperature	T _C	°C	>240	
Mean value of α_F at 25 ... 55 °C		10 ⁻⁶ /K	—	
Density (typical values)		kg/m ³	4750	
Relative core losses (typical values)	P _V			
		25 kHz, 200 mT, 100 °C	kW/m ³	—
		100 kHz, 200 mT, 100 °C	kW/m ³	—
		300 kHz, 100 mT, 100 °C	kW/m ³	330
		500 kHz, 50 mT, 100 °C	kW/m ³	80
1 MHz, 50 mT, 100 °C	kW/m ³	475		
Resistivity	ρ	Ωm	17	
Core shapes	RM, EFD, ELP, Toroid, EQ, ER			

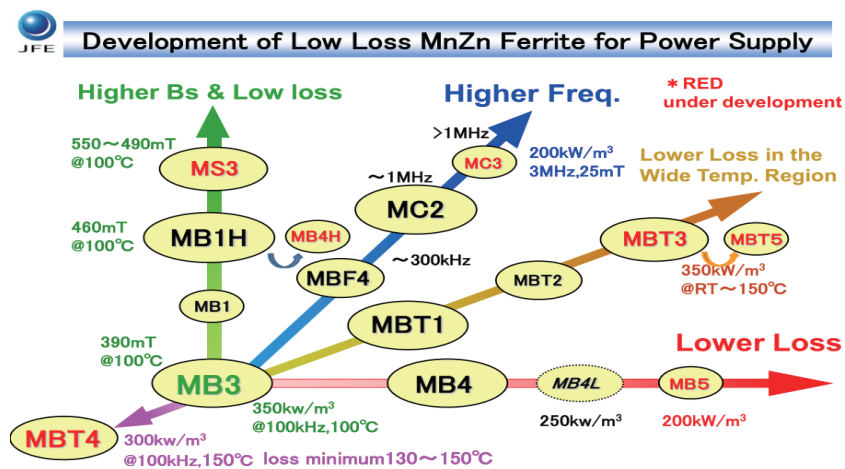
日立公司高频锰锌铁氧体 ML12D 材料的性能指标

Material : ML12D

Initial permeability	μ_i		23°C	1200 $\pm 25\%$
Saturation magnetic flux density at 800A/m	B_m	(mT)	23°C	540
			100°C	440
Remanent flux density	B_r	(mT)	23°C	280
			100°C	200
Coercive force	H_c	(A/m)	23°C	60
			100°C	50
Core loss volume density 1MHz 50mT	P_{cv}	(kW/m ³)	23°C	220
			40°C	190
			60°C	180
			80°C	200
			100°C	250
			120°C	340
Relative loss factor	100kHz	$\tan\delta/\mu_i$	($\times 10^{-6}$)	3.5
Curie temperature	T_c	(°C)		> 200
Electrical resistivity	ρ	($\Omega\cdot m$)		6.0
Density	d_s	(kg/m ³)		4.80×10^3

Test core : Toroidal
OD = 25mm ID = 15mm TH = 5mm

JFE 川崎公司锰锌铁氧体新材料 (高 T_c 、高 B_s 、高频高 ρ 、低 P_{cv} 方向)



JFE (川崎公司) 高电阻率 ρ 、高 B_s 低功耗锰锌铁氧体材料性能

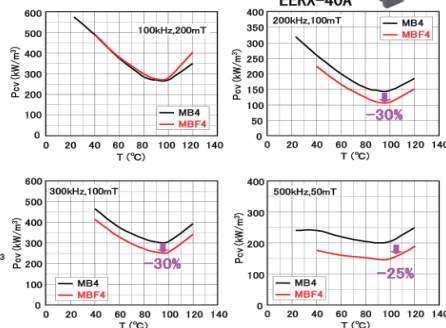
MnZn Ferrite Suitable for Drive at 100k~500kHz: MBF4

Lower loss at from 100 to 500kHz than that of MB4

Application / SMPS general; suitable for forward type

Material properties		MB4	MBF4
Material		MB4	MBF4
Core loss (at 100kHz, 200mT)	P_{cv} (kW/m ³)	575	575
	23°C	375	375
	100°C	270	270
Effective saturation flux density (at 1200A/m)	B_{ms} (mT)	520	520
	23°C	400	400
Effective saturation residual flux density	B_{rms} (mT)	130	130
	100°C	54	54
Initial permeability	μ_i / μ_o	2500	2100
Curie point	T_c (°C)	≥ 215	≥ 215
Core density	d (kg/m ³)	$4.9 \times 10^3 \sim 4.8 \times 10^3$	
Resistivity	ρ ($\Omega\cdot m$)	4.5	15

μ_o : vacuum permeability



实现高频低损耗的技术工艺措施

锰锌铁氧体的电磁性能不仅仅取决于它的组份，而且还与其微观结构密切相关。通过控制颗粒尺寸和微量添加剂在晶界的分布，可改善其损耗性能。因为细晶粒结构和晶界绝缘层的存在能够降低涡流损耗。特别是在高频下，提高晶界电阻率效果更佳。

不少研究证实了钙在铁氧体晶粒边界富集，对磁导率和晶界电阻率的有利影响，而烧结和冷却过程中氧含量的优选对钙在晶界分布、锰的变价和烧成后的铁氧体中 Fe^{2+} 含量都有着重要影响。

由于缺陷的存在和杂质在晶界的富集能够显著提高晶界的电阻率，因此通过细化晶粒和增厚晶界，可以显著提高整块材料的电阻率，从而使磁心更能耐受大电流冲击。

在 500kHz 或更高的使用频率下，涡流损耗占主要地位。涡流损耗能通过提高材料电阻率来降低。从 Fe^{3+} 到 Mn^{2+} 的电子激活能比从 Fe^{3+} 到 Fe^{2+} 的稍高，因此可以通过提高锰含量来提高电阻率，优选氧化铁含量，采用低锌配方，组合添加 $CaO-Si-TiO_2$ ，晶界形成高阻玻璃相，则可成功得到应用于 1.5MHz 或更高频率的超低功耗 Mn-Zn 铁氧体材料。

此外，还得改善材料宽温特性。因为在一定范围内，饱和磁通密度 B_s 随 Fe_2O_3 含量的增加而增大，而 ZnO 含量过多则会造成材料高温饱和磁通密度 B_s 和居里温度 T_c 的下降。除保证材料基本磁特性外，还得同时平衡各种微量成分的添加，使磁心损耗的主要部分磁滞损耗在宽温范围减小，如掺入高价元素可使 Fe^{2+} 含量增加，最低损耗点向低温区移动，掺入低价元素可使 Fe^{2+} 含量减少，最低损耗点向高温区移动，为了控制磁晶各向异性常数 K_1 的温度特性，用来改变 $\mu-T(K_1-T)$ 特性的金属离子 (Co^{3+} 、 Ti^{4+}) 带来的负面影响，必需寻找行之有效的微量元素来冲淡以致消除。

要得到高频低功耗材料全面优异的电磁性能，必须优选材料烧结温度、气氛和冷却速度的最佳配合，达到控制铁氧体微观结构、晶粒尺寸、空位浓度和宏观密度的目的，还必须精细调整预热、排胶、烧结、冷却各段温度曲线和与之适应的气氛。

控制好烧结气氛和烧结曲线是得到正确化学组成和优良微观结构的首要条件。在烧结过程中氧分压决定 $Fe^{2+}/$

Fe^{3+} 比率。平衡冷却曲线中 PO_2 与温度的关系由 Blank 方程试验决定，烧结温度和加热速率及高温保温时间是得到优良微观结构的重要因素。

实例一：2000年横店东磁金鑫、邵顺中制作

通过调整 CaO 和 TiO_2 的加入量，优化烧结、冷却曲线和气氛，1200℃下烧结 2hr，得到了均匀的微观结构。材料在 700kHz，50mT 和 80℃测定时有着很低的功耗（约 160mw/cm³）。性能如图 1、图 2 所示。

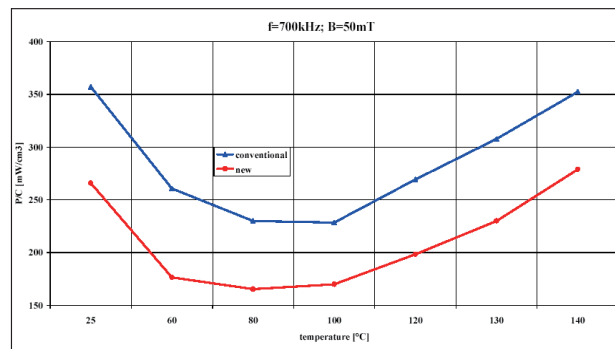


图1 高频材料的损耗温度特性

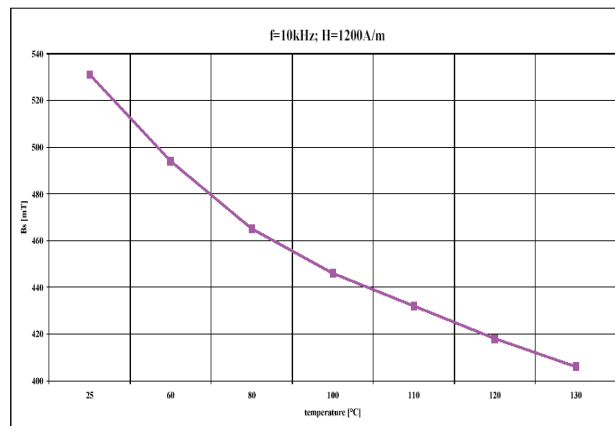


图2 高频材料饱和磁通密度与温度的关系

实例二：2006年南京精研王修炜、薛虎制作

高居里点宽温高频低功耗铁氧体材料，主要组成及含量以氧化物计算为： Fe_2O_3 为 55.7mol%、ZnO 为 4mol%、其余为 MnO ， SiO_2 为 50ppm， $CaCO_3$ 为 500ppm。杂质添加：选择 Ni_2O_3 为 1000ppm、 Nb_2O_5 为 200ppm、 TiO_2 为 1500ppm、 SnO_2 为 750ppm、 Co_2O_3 为 4000ppm 联合添加。

烧结样环的磁性能和密度测试结果（见下表）。

随 Fe_2O_3 含量增加和 ZnO 含量的减少， B_s 和 T_c 上升，但 μ_i 下降；随 TiO_2 和 Co_2O_3 联合补偿作用的加强，比温

电磁性能	测试条件	实例 1	实例 2	实例 3
初始磁导率 μ_i	频率 :10kHz	1920	1800	1540
比温度系数 $\alpha_T \times 10^{-6}$	-40 ~ +25°C, 同测 μ_i	2.6	2.8	2
居里温度 T_c (°C)	频率 :10kHz	275	283	288
饱和磁通密度 B_s (mT)	1194A/m, 50Hz, 100°C	455	462	465
低频特性 (Pcv kw/m ³)	200kHz, 100mT, 100°C	195	210	180
高频特性 (Pcv kw/m ³)	500kHz, 50mT, 100°C	125	100	115
高频特性 (Pcv kw/m ³)	1MHz, 30mT, 100°C	225	195	210
高频特性 (Pcv kw/m ³)	3MHz, 10mT, 100°C	320	305	315
密度 (10 ³ kg/m ³)	25°C	4.8	4.9	4.85

度系数降低, 宽温特性变好; 掺杂体系确保了高低频功耗的平衡和降低; 气氛控制及预保温等工艺使材料密度提高的作用明显。

实例三: 2013年桐乡耀润陆自强徐方制作

采用多铁低锌配方, 可大大提高饱和磁通密度 B_s , 但 Pcv-T 曲线尾巴上翘, 高温功耗奇大, 优选各种微量成分, 利用添加物间的相互牵制与平衡, 去除为压平陡翘曲线掺入 Co^{3+} 、 Ti^{4+} 的负面影响, 可以选择 K^{+} 、 Li^{+} 等行之有效的碱金属离子去冲淡以致消除。有效掺杂体系确保了饱和磁通密度 B_s 和功耗 Pcv 的宽温特性;

气氛烧结工艺的精细控制使材料密度提高的作用明显, 冷却速率在一定范围, 能极大降低锰锌铁氧体的磁心损耗, 从而可获得兼具 PC90 的高 B_s 和 PC95 的宽温低功耗特性的 YR950 材料; YR950 材料的基本配方和掺杂体系稍加调整, 选择合理的气氛烧结工艺, 就能得到高频功耗不逊于 PC50 的高 B_s 材料。

YR950材料实测样环性能

电磁性能	测试条件	实例1	实例2
初始磁导率 μ_i	25°C 频率: 10kHz	3310	3550
居里温度 T_c (°C)	同测 μ_i	255	250
饱和磁通密度 B_s (mT)	1194 A/m, 50Hz, 100°C	450	445
功耗 (Pcv kw/m ³)	100kHz, 200mT, 25°C	330	345
功耗 (Pcv kw/m ³)	100kHz, 200mT, 60°C	347	366
功耗 (Pcv kw/m ³)	100kHz, 200mT, 100°C	310	320
功耗 (Pcv kw/m ³)	100kHz, 200mT, 120°C	360	355
密度 (kg/m ³)	25°C	4.87	4.85

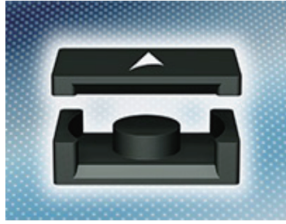
岩崎公司SY8232 B-H测试仪, 安捷伦公司HP4192A阻抗分析仪

结语

追求高频低功耗锰锌材料目前似乎并无太多新意, 其一, 电源的高频化一直没有那么快, 所以 500kHz 以上的材料如: PC50, 3F4, 3F5 等都没有大的需求; 其二, 十多年前就已开发了类似材料, 比如日立有 ML12D, 川崎有老 MC2, 菲磁有 3F4, 3F45, 3F5, FDK 有 7H20, 东磁、天通、新康达、越峰、安磁都有用到 500kHz--3MHz--5MHz 的材料, 虽然更高频率功耗偏大, 如果真有大的市场, 这些公司应有技术能力应对。

制作高频锰锌材料时采用多铁低锌配方, 若适量加铁减铁增锰, 可大大提高饱和磁通密度 B_s , 降低 B_r 和 Pcv, 改善磁心直流叠加特性 (DC-Bias), 结果造就了锰锌铁氧体新材料 (高 T_c 、高 B_s 、高 ρ 、低 Pcv) 的出现; 将此类材料的基本配方和掺杂体系稍加调整, 选择合理的气氛烧结工艺, 又能得到高频功耗不逊于 PC50, 且具宽温特性、高居里温度的高 B_s 材料。这种理念为探索全能材料和配方给出了方向, 特别是近期热门的宽温高叠加和宽频高阻抗材料, 具体制作实例将另文报导。

参考文献 (略)



铁氧体

2015 四月

高频低损耗

TDK集团最近推出了一款新型爱普科斯 (EPCOS) N59铁氧体磁材, 其具有高频低损耗的特性。该磁材专门为电源及变频器 (配备基于GaN的快速切换功率半导体) 应用而开发, 优化后的频率范围为700 kHz至2 MHz。

在切换频率为2 MHz, 工作温度为100 °C时, 可达到最大传输功率。铁氧体磁材的最大居里温度为280 °C。

N59铁氧体磁材尤其适用于磁环或平板变压器。其卓越的性能, 为今后设计电源小型化, 提供了非常好的解决方案。同时, 由于铁氧体磁材的低损耗特性, 其效率也大大提升, 这正是使用N59可显著节能的原因。

主要应用

- 电源变压器和转换器 (配备基于GaN的快速切换功率半导体)

主要特点和效益

- 频率为700 kHz至2 MHz时功耗低; 频率为2 MHz时, 传输功率达到最大



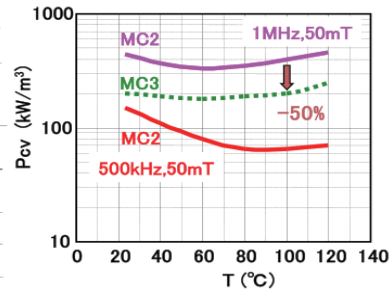
MnZn Ferrite for High Frequency Application : MC2

Low loss at from 500k to 1MHz

Application / SMPS driving at high frequencies

Material		MC2	
Core loss	P _{cv} (kW/m ³)	23°C	150
		60°C	80
		100°C	65
Effective saturation flux density (at 1200A/m)	B _{ms} (mT)	23°C	440
		60°C	330
		100°C	400
Effective saturation residual flux density	B _{rms} (mT)	23°C	180
		100°C	110
Initial permeability	μ_i / μ_o	1250	
Curie point	T _c (°C)	≥260	
Core density	d (kg/m ³)	4.8 × 10 ³	
Resistivity	ρ (Ωm)	15	

μ_o : vacuum permeability



MC3 (under development) : 1~3MHz

		ML95S (此次开发产品)	ML90S (此次开发产品)	MB28D (该公司原产品)	NL80S (该公司原产品)
磁芯损耗					
频率1MHz	100°C	240kW/m ³	200kW/m ³	1,500kW/m ³	2,800kW/m ³
磁通密度50mT					
频率1MHz	100°C	1,100kW/m ³	1,700kW/m ³	3,800kW/m ³	—
磁通密度75mT					
频率2MHz	100°C	1,900kW/m ³	1,300kW/m ³	6,800kW/m ³	7,500kW/m ³
磁通密度50mT					
饱和磁通密度 ²	100°C	430mT	430mT	440mT	290mT
初始磁导率		1,100	900	2,800	800
电阻率		5.0Ωm	4.5Ωm	8.0Ωm	10 ⁵ Ωm
居里温度 ³		280°C	280°C	240°C	210°C

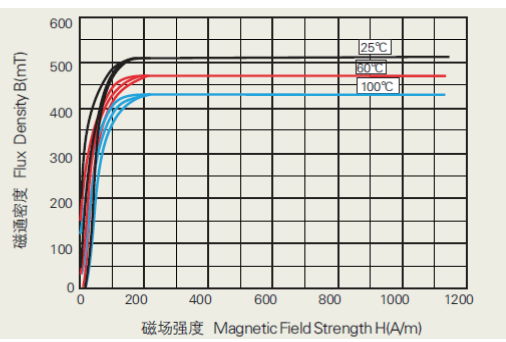
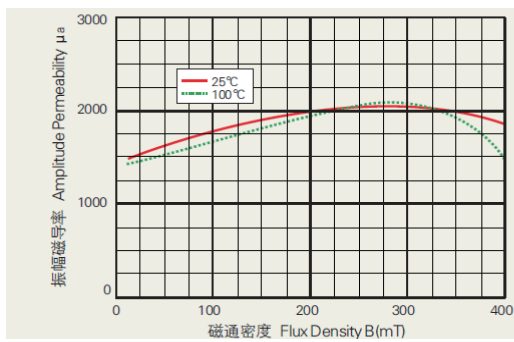
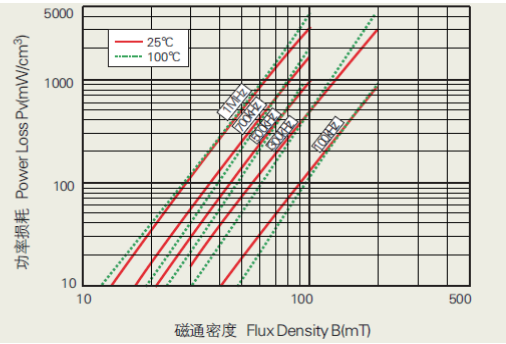
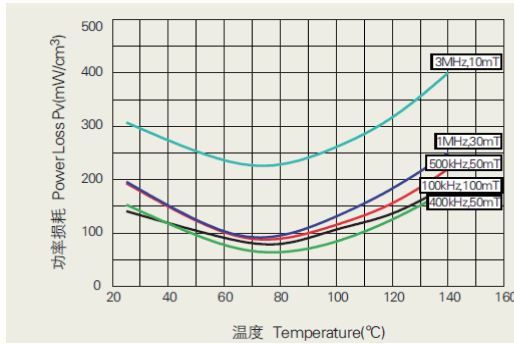
表: 新開發的磁芯材料和原產品的性能參數比較



MnZn Ferrite Working at Higher Temperatures above 100°C: MBT4

Material			MB3	MB4	MB1H	MBT1	MBT4
Initial Permeability	μ_i	23°C	2500	2500	1700	3400	1500
Saturation Flux Density Bms [mT] @1200A/m		23°C	510	520	540	510	537
		60°C	450	470	505	460	503
		100°C	390	400	460	390	460
		130°C	325	350	410	340	405
		140°C	300	330	400	325	400
Core Loss @100kHz,200mT	Pcv [kW/m ³]	23°C	650	575	980	395	900
		60°C	440	375	600	365	605
		100°C	350	270	380	340	407
		120°C	390	350	550	390	332
		130°C	430	440	675	420	299
		140°C	485	525	775	465	286
Curie Point	Tc [°C]		215min	215min	300min	230min	300min
Resistivity	ρ [Ω m]		6.0	4.5	6.0	4.0	5.0
Density	d [kg/m ³]		4.9 × 10 ³		4.9 × 10 ³		4.9 × 10 ³

(provisional values of the lab. level)



以上数据是根据标准样环 $\phi 25 \times \phi 15 \times 8$ 获得的典型数据, 有关产品的具体性能会在此基础上有所调整。
The above typical data are calculated from the standard toroid core. Specific performance of the product will be adjusted on this basis.

DMR50材料特性 · DMR50 Material characteristics

特性 SYMBOL	测试条件 CONDITIONS		典型值 VALUE
初始磁导率 μ Initial permeability	10kHz, B<0.25mT	25 °C	1400 ± 20%
饱和磁通密度 B_s (mT) Saturation flux density	50Hz, 1194A/m	25 °C	470
剩磁 B_r (mT) Residual magnetic flux density		100 °C	380
矫顽力 H_c (A/m) Coercive force		25 °C	140
		100 °C	98
功耗 P_{cv} (mW/cm ³) Power loss	500kHz, 50mT	25 °C	130
	500kHz, 50mT	100 °C	80
居里温度 T_c (°C) Curie temperature	10kHz, B<0.25mT		>240
密度 d (g/cm ³) Density		25 °C	4.8

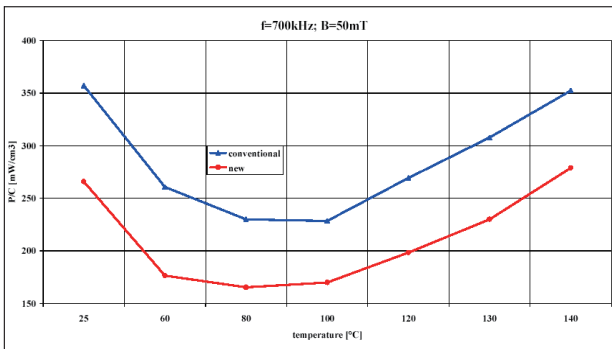
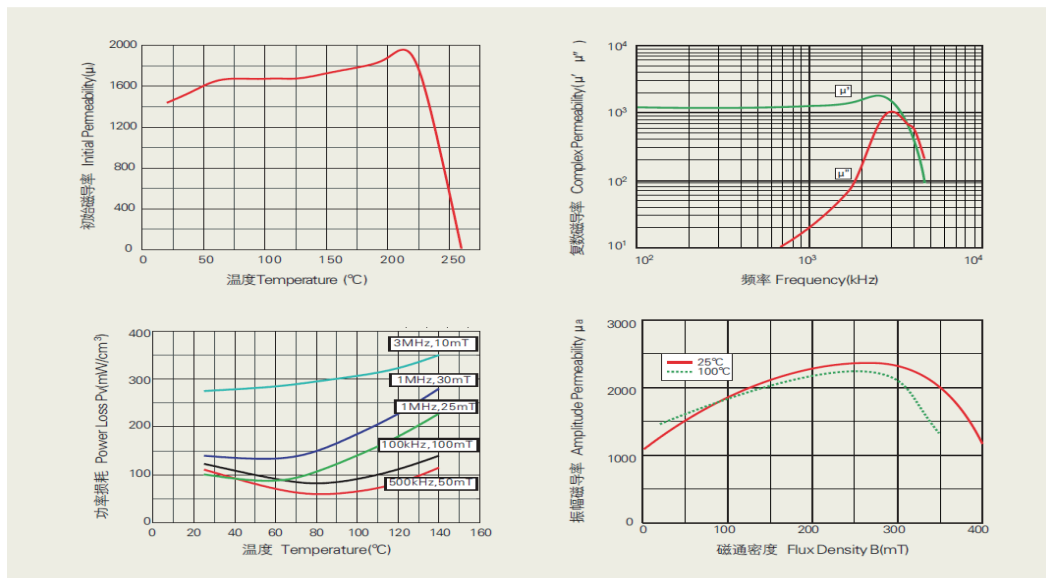


图1 高频材料的损耗温度特性

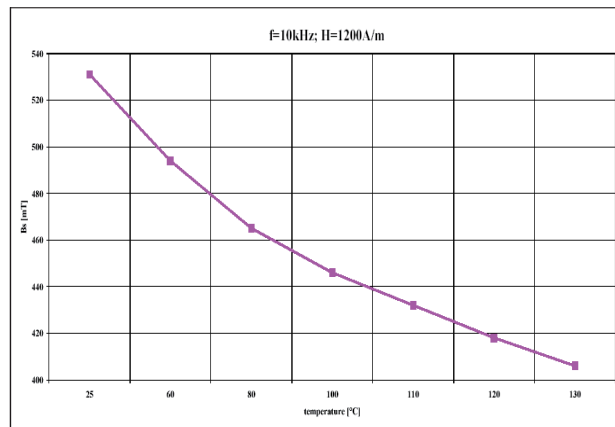
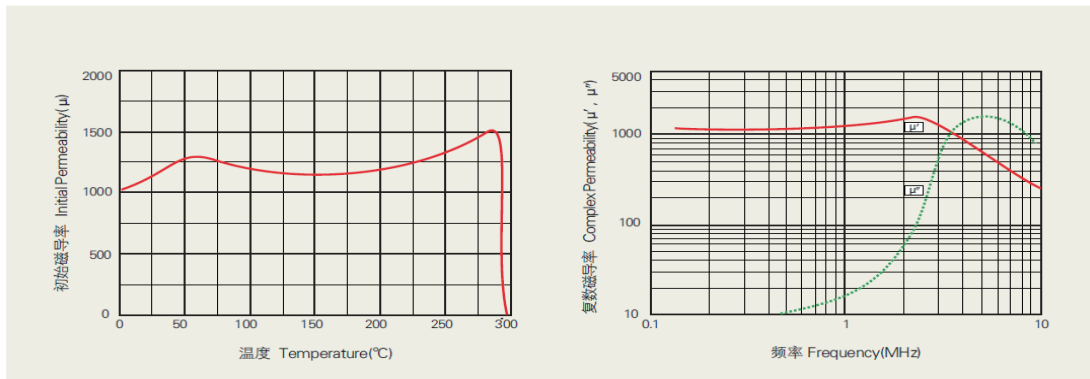


图2 高频材料饱和磁通密度与温度的关系

DMR50B材料特性 · DMR50B Material characteristics

特性 SYMBOL	测试条件 CONDITIONS		典型值 VALUE
初始磁导率 μ_i Initial permeability	10kHz, B<0.25mT	25°C	1500 ± 20%
饱和磁通密度 Bs (mT) Saturation flux density	50Hz, 1194A/m	25°C	510
		100°C	410
剩磁 Br(mT) Residual Magnetic Flux Density		25°C	130
		100°C	90
矫顽力 Hc (A/m) Coercive force		25°C	30
		100°C	25
功耗 Pv(mW/cm ³) Power loss	100kHz, 100mT	100°C	150
	400kHz, 50mT	100°C	120
	500kHz, 50mT	100°C	150
	1MHz, 30mT	100°C	180
	3MHz, 10mT	100°C	260
居里温度 Tc (°C) Curie temperature	10kHz, B<0.25mT		> 240
密度 d(g/cm ³) Density		25°C	4.7



【日經BP社報導】日立金屬公司開發出了高頻特性出色的錳鋅 (Mn-Zn) 類鐵氧體磁芯材料“ML95S”和“ML90S” (圖)。新材料在幾MHz高頻範圍內的磁芯損耗較小，可使網路設備、汽車以及智慧手機配備的部件實現小型化和節能化。

此前也有過在0.5MHz~5MHz的高頻範圍採用鎳鋅 (Ni-Zn) 類鐵氧體材料的討論，日立金屬此次通過組合使用粉末控制技術和熱處理技術，實現了與Ni-Zn類鐵氧體材料相比飽和磁通密度更高、磁芯損耗更小的Mn-Zn類鐵氧體材料。這種材料在接近實際使用環境的高溫環境下 (80~100°C) 的磁芯損耗較小，因此可以抑制功耗和發熱量。採用該材料後，可使變壓器和電感器支援高頻化和大電流化，實現網路設備的小型化和節能化。今後，日立金屬還計劃把這款材料用於汽車電裝部件和便攜終端。

兩款產品的性能參數見右表。ML95S在500kHz~2MHz的頻率範圍內，尤其是在50mT以上的高磁通密度範圍內驅動時，損耗較小。比如，在頻率為1MHz、磁通密度為75mT (100°C) 時，ML95S的磁芯損耗僅為原產品“MB28D”的1/3左右。ML90S在1MHz~5MHz的頻率範圍內，尤其在50mT以下的磁通密度範圍內驅動時，損耗較小。當頻率為2MHz、磁通密度為50mT (100°C) 時，其磁芯損耗約為MB28D的1/5。

近幾年，伺服器等網路設備的容量和速度不斷提升，尤其是數據中心，為了降低空調電費、改善設施整體的能量效率，強烈要求網路設備實現小型化、降低排熱量。與此同時，伺服器電源中使用的半導體的高頻化和大電流化技術不斷發展，所採用的變壓器和電感器等無源元件也要求支援高頻化和大電流化。但是，在高頻範圍驅動原來的無源元件時，主要部材——磁芯材料的磁芯損耗非常高，因此電力轉換效率會出現下降。而且發熱量也較大，可能會給周邊部件帶來影響。這就需要在高頻範圍內磁芯損耗較低，而且不易發熱的磁芯材料。

另外，日立金屬將在日立Ferrite電子公司 (總部：日本鳥取市) 和日立金屬 (香港) 有限公司番禺工廠 (廣東省廣州市) 生產這種新材料。據介紹，量產體制已經建成。(本篇報導、照片與圖片，版權為日經BP社所有，僅供公司內部研究參考用，請勿隨意轉載)

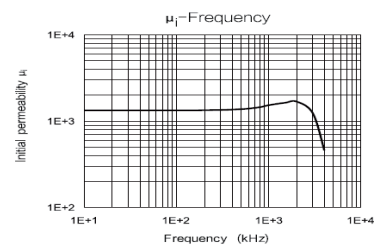
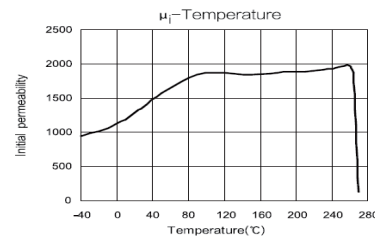
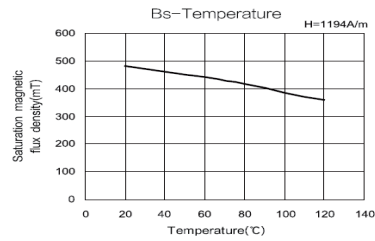
DMR1.2K 材料特性
DMR1.2K Material Characteristics

项目 Item	符号 Symbol	测试条件 Conditions	标称值 Value	单位 Unit
初始磁导率 Initial Permeability	μ_i	25°C; 10kHz; B<0.25mT	1200±25%	—
振幅磁导率 Amplitude Permeability	μ_a	100°C; 25kHz; 200mT	> 1700	—
饱和磁通密度 Saturation flux density	Bs	25°C; 50Hz; 1194A/m 100°C; 50Hz; 1194A/m 120°C; 50Hz; 1194A/m	500 420 400	mT
体积功耗 Power Loss	Pcv	100°C; 1MHz; 30mT 100°C; 3MHz; 10mT 100°C; 5.64MHz; 2.5mT	150 260 150	kW/m ³
矫顽力 Coercive Force	Hc	25°C	≤30	A/m
直流电阻率 Resistivity	ρ	25°C, DC	≈10	Ω·m
居里温度 Curie Temperature	Tc	f=10kHz B<0.25mT	>220	°C
密度 Density	d		≈4.7×10 ³	kg/m ³

材料/Material: TP5

特点/Features:

1. 主要应用于高频段 (300kHz到1MHz)/Mostly Used at High Frequency (From 300 kHz To 1 MHz)
2. 损耗最低的温度点在80°C/ The Temperature Point of The Lowest Core Loss is 80°C



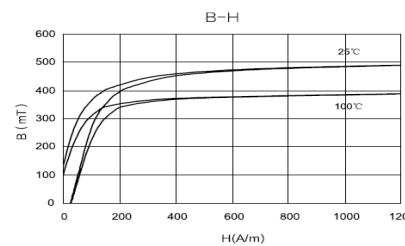
Initial permeability	μ_i	25°C	1400±25%	
Saturation magnetic flux density	Bs(mT)	25°C	470	
	1194A/m	100°C	380	
Remanence	Br(mT)	25°C	140	
		100°C	98	
Coercivity	Hc(A/m)	25°C	36.5	
		100°C	27.2	
Core loss Pcv(kW/m ³)		25°C	130	
		500kHz 50mT	100°C	80
		1MHz 50mT	60°C	600
		100°C	500	
Curie temperature			≥240	
Electrical resistivity	$\rho(\Omega\cdot m)$		8	
Density	d(kg/m ³)		4.7×10 ³	

Test core: Toroid(mm)

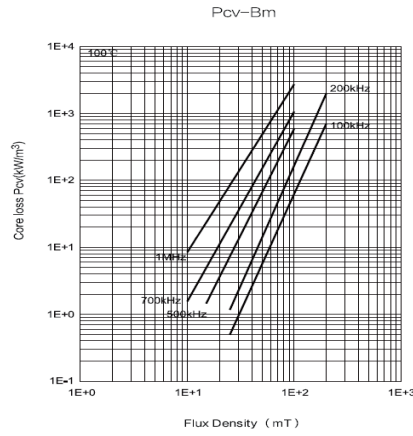
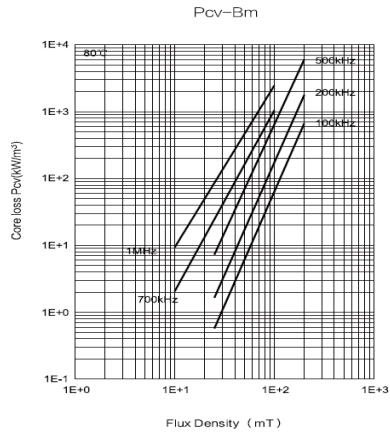
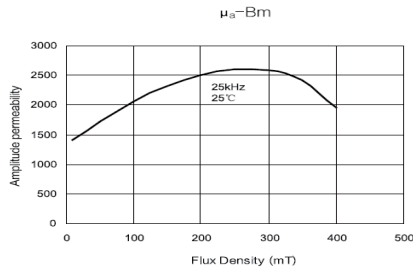
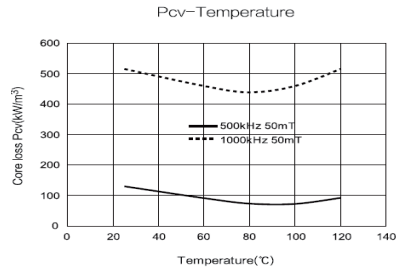
OD: 25

ID: 15

H: 7.5



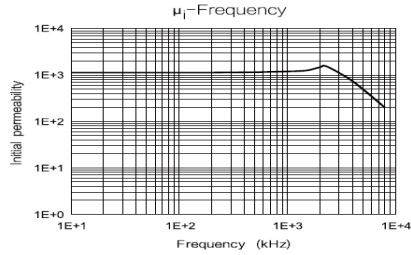
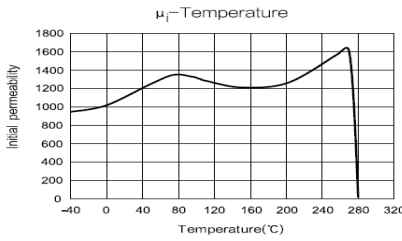
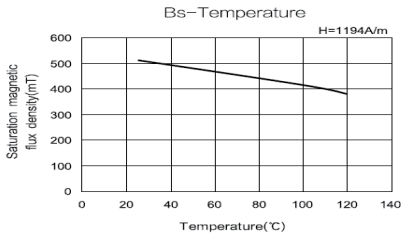
材料/Material:TP5



材料/Material:TP5B

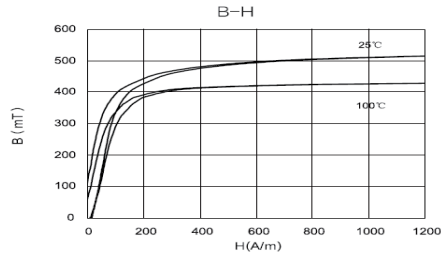
特点/Features:

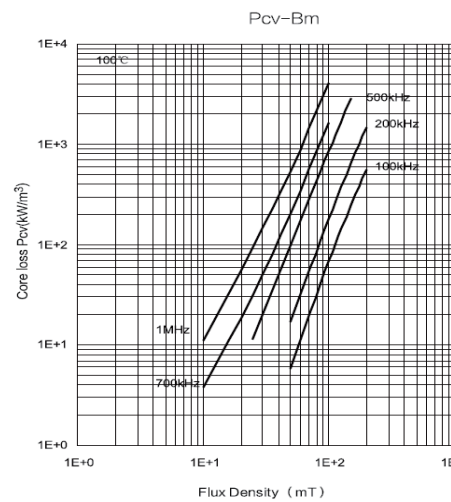
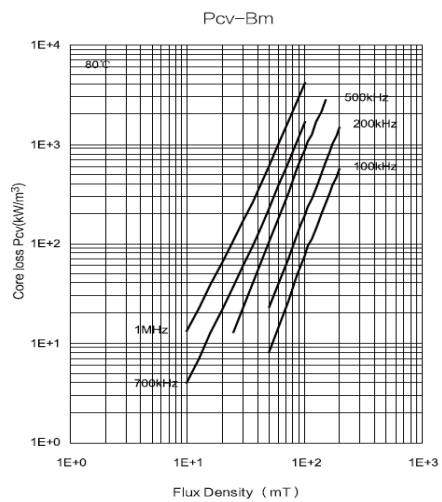
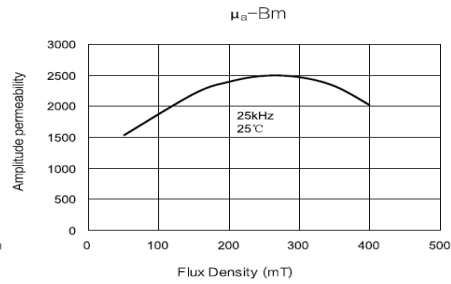
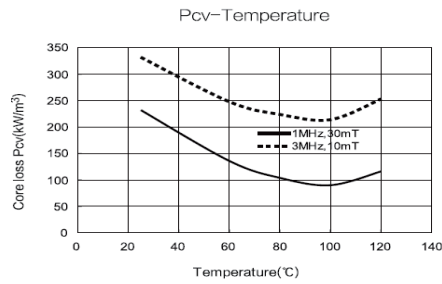
1. 主要应用于超高频段 (1MHz ~ 3MHz) / Mostly used at high Frequency (From 1MHz to 3MHz)
2. 低磁芯损耗, 较高的饱和磁感应强度 / Low Core Loss and High Bs
3. 功耗最低点在100°C左右 / The minimum Core Loss is around 100°C



Initial permeability	μ_i	25°C	1200±25%
Saturation magnetic flux density	Bs(mT)	25°C	510
		100°C	410
Remanence	Br(mT)	25°C	95
		100°C	45
Coercivity	Hc(A/m)	25°C	22
		100°C	16
Core loss Pcv(kW/m³)	1MHz	25°C	250
		100°C	100
	3MHz	25°C	350
		100°C	230
Curie temperature	Tc(°C)	≥265	
Electrical resistivity	$\rho(\Omega\cdot m)$	9	
Density	d(kg/m³)	4.7×10³	

Test core: Toroid(mm)
OD: 25
ID: 15
H: 7.5





■ Material Characteristics (4)

	Symbol	Unit	Measuring Conditions			High Frequency Low Loss Material
			Freq.	Flux den.	Temp.	P6 ◀NEW▶
Initial Permeability	μ_i		$\leq 10\text{kHz}$	0.25mT	25°C	900 \pm 25%
Amplitude Permeability	μ_a		25kHz	200mT	25°C	1800
					100°C	1500
Power Loss	Pv	KW/m ³	1MHz	50mT	25°C	300
					100°C	250
			3MHz	10mT	25°C	150
					100°C	150
Saturation Flux Density	Bms	mT	10kHz	H = 1200A/m	25°C	490
					100°C	400
Remanence	Brms	mT	10kHz	H = 1200A/m	25°C	200
					100°C	130
Coercivity	Hc	A/m	10kHz	H = 1200A/m	25°C	45
					100°C	35
Hysteresis Material Constant	η_B	10 ⁻⁶ /mT	10kHz	1.5-3.0mT	25°C	< 1
Disaccommodation Factor	Df	10 ⁻⁶	10kHz	< 0.25 mT	25°C	< 2
Curie Temperature	Tc	°C				> 250
Resistivity	ρ	Ωm				10.00
Density	d	g/cm ³				4.80

Note: Material characteristics are typical for a toroid core.
Product specification will differ from these data due to the influence of geometry and size.

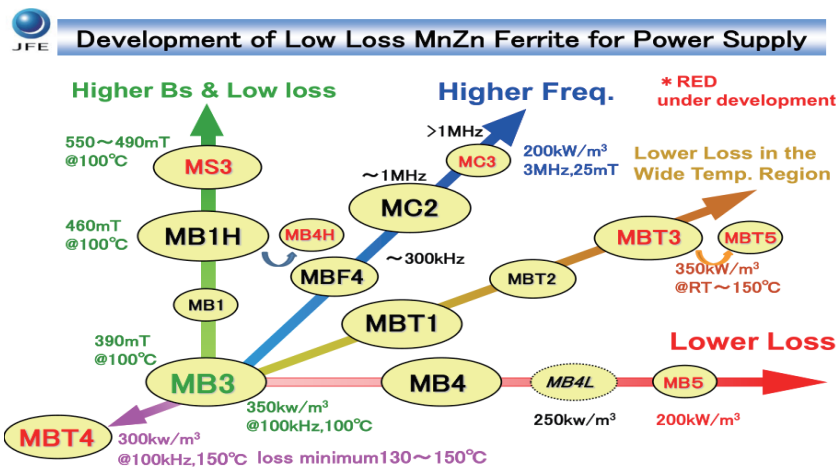


SIFERRIT materials			
N49			
Material properties			
Preferred application		Power transformers	
Material		N49	
Base material		MnZn	
	Symbol	Unit	
Initial permeability (T = 25 °C)	μ_i		1500 ±25%
Flux density (H = 1200 A/m, f = 10 kHz)	B_S (25 °C)	mT	490
	B_S (100 °C)	mT	400
Coercive field strength (f = 10 kHz)	H_c (25 °C)	A/m	38
	H_c (100 °C)	A/m	33
Optimum frequency range		kHz	300 ... 1000
Hysteresis material constant	η_B	$10^{-6}/mT$	<0.4
Curie temperature	T_C	°C	>240
Mean value of α_F at 25 ... 55 °C		$10^{-6}/K$	—
Density (typical values)		kg/m ³	4750
Relative core losses (typical values)	P_V		
25 kHz, 200 mT, 100 °C		kW/m ³	—
100 kHz, 200 mT, 100 °C		kW/m ³	—
300 kHz, 100 mT, 100 °C		kW/m ³	330
500 kHz, 50 mT, 100 °C		kW/m ³	80
1 MHz, 50 mT, 100 °C	kW/m ³	475	
Resistivity	ρ	Ωm	17
Core shapes			RM, EFD, ELP, Toroid, EQ, ER

Material : ML12D

Initial permeability	μ_i	23°C	1200 ±25%	
Saturation magnetic flux density at 800A/m	B_m	(mT)	23°C	540
			100°C	440
Remanent flux density	B_r	(mT)	23°C	280
Coercive force	H_c	(A/m)	23°C	60
			100°C	50
Core loss volume density 1MHz 50mT	P_{cv}	(kW/m ³)	23°C	220
			40°C	190
			60°C	180
			80°C	200
			100°C	250
			120°C	340
Relative loss factor 100kHz	$\tan\delta/\mu_i$	($\times 10^{-6}$)		3.5
Curie temperature	T_c	(°C)		> 200
Electrical resistivity	ρ	($\Omega\cdot m$)		6.0
Density	d_s	(kg/m ³)		4.80×10^3

Test core : Toroidal
OD = 25mm ID = 15mm TH = 5mm





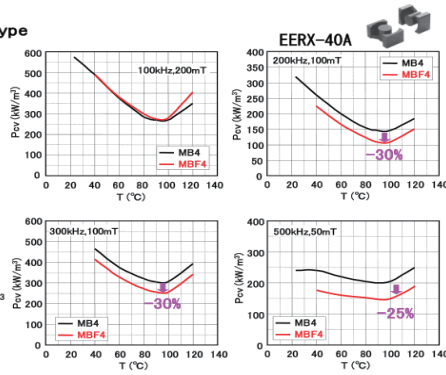
MnZn Ferrite Suitable for Drive at 100k~500kHz: MBF4

Lower loss at from 100 to 500kHz than that of MB4

Application
SMPS general; suitable for forward type

Material properties		MB4	MBF4
Material		MB4	MBF4
Core loss (at 100kHz, 200mT)	Pcv (kW/m ³) 23°C	575	575
	60°C	375	375
	100°C	270	270
Effective saturation flux density (at 1200A/m)	Bms (mT) 23°C	520	520
	100°C	400	400
Effective saturation residual flux density	Brms (mT) 23°C	130	130
	100°C	54	54
Initial permeability	μ_i / μ_o	2500	2100
Curie point	Tc (°C)	≥ 215	≥ 215
Core density	d (kg/m ³)	4.9 × 10 ⁴ 4.8 × 10 ³	
Resistivity	ρ (Ωm)	4.5	15

μ_o : vacuum permeability



电磁性能	测试条件	实例 1	实例 2	实例 3
初始磁导率 μ_i	频率: 10kHz	1920	1800	1540
比温度系数 $\alpha_F \times 10^{-6}$	-40 ~ +25°C, 同测 μ_i	2.6	2.8	2
居里温度 Tc (°C)	频率: 10kHz	275	283	288
饱和磁通密度 Bs (mT)	1194A/m, 50Hz, 100°C	455	462	465
低频特性 (Pcv kW/m ³)	200kHz, 100mT, 100°C	195	210	180
高频特性 (Pcv kW/m ³)	500kHz, 50mT, 100°C	125	100	115
高频特性 (Pcv kW/m ³)	1MHz, 30mT, 100°C	225	195	210
高频特性 (Pcv kW/m ³)	3MHz, 10mT, 100°C	320	305	315
密度 (10 ³ kg/m ³)	25°C	4.8	4.9	4.85